

文章编号 1004-924X(2011)04-0709-08

离轴非球面的计算全息图高精度检测技术

黎发志^{1,2}, 罗 霄^{1,2}, 赵晶丽¹, 薛栋林¹, 郑立功¹, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术
重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了实现离轴非球面高精度定位、光路对准及面形检验,提出了一种使用计算全息图(CGH)技术实现离轴非球面高精度光学检测的方法。将被检非球面倾斜平移后作为轴上自由曲面进行 CGH 补偿检测设计,从而减小了检测光路的相对口径和 CGH 所需补偿像差,提高了 CGH 检测精度。使用自行开发的 CGH 专用设计计算软件,设计完成的 CGH 同时具有非球面检验、检测光路对准、被检非球面基准定位等多项功能。采用该方法设计(设计精度优于 $\lambda/10\ 000$ rms)并制作 CGH 对面形精度优于 $\lambda/50$ rms 的离轴非球面进行了检测,误差分析表明,其检测精度优于 $\lambda/100$,与传统 null-lens 方法的检测结果精确吻合。实验表明,采用该 CGH 可同时实现离轴非球面位置高精度定位、CGH 与干涉仪对准以及离轴非球面高精度面形检验。

关键词:计算全息图;衍射光学元件加工;离轴非球面;光学检测

中图分类号:TQ171.65;O438.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0709

Test of off-axis aspheric surfaces with CGH

LI Fa-zhi^{1,2}, LUO Xiao^{1,2}, ZHAO Jing-li¹, XUE Dong-lin¹, ZHENG Li-gong¹, ZHANG Xue-jun¹

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A new test method based on a Computer-generate Hologram(CGH) was presented for precisely testing off-axis aspheric surfaces and aligning the optics in tests. In this method, off-axis aspheric surfaces were tilt-translated and tested as an on-axis freeform optics to minimize the wavefront compensation and to reduce the relative aperture of the test setup. A software was developed to design the CGH to implement three kinds of diffractive sections, i. e. compensating wavefront in null test, aligning the optical path by adjusting the relative position between CGH and interferometer, and projecting fiducial marks around the optics. As an example, a typical off-axis aspheric surface with a figure error less than $\lambda/50$ rms was tested in this method. Results indicate that the CGH design error is better than $\lambda/10\ 000$ rms and the total error is better than $\lambda/100$ rms. These data agree well with the test result with null lens. The experiment also verifies the feasibility of alignment and fiducial sections and demonstrates that cross-lines projected by CGHs can be used as fiducial to guide the alignment of

收稿日期:2010-04-19;修订日期:2010-08-06.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 61036015)

the optics and measure the off-axis distance.

Key words: Computer-generated Hologram (CGH); Diffractive Optical Element (DOE) fabrication; off-axis aspherics; optical testing

1 引言

离轴光学系统具有无中心遮拦、传递函数高、结构紧凑、易同时实现大视场与高分辨率等优点,典型离轴光学系统应用于空间遥感的离轴三反光学系统^[1]或真空紫外光刻的离轴四反光学系统^[2-3]均以其优越的性能而备受青睐。然而,离轴光学系统的制造难度远高于传统的同轴光学系统,其中高精度离轴非球面检测是实现离轴光学系统制造的关键技术之一。

目前,非球面的主要检测方法有轮廓测量法、无像差点法、光学补偿法、子孔径拼接法^[4]等,其中轮廓测量法受到测量仪器的精度限制,不能用于检测高精度非球面光学元件,无像差点法适合二次曲面的检测,其缺点是当检验大口径非球面时,需要更大口径的 Hindle 球或者大口径的辅助镜面,材料和工艺上均有难度。

光学补偿检验法^[5-6]是目前非球面检验的主流技术,按照光学补偿器类型,该技术可以分为折射式光学补偿法、反射式光学补偿法和衍射式光学补偿法。传统的折射式光学补偿法和反射式光学补偿法起源较早,一般使用多个球面组成的补偿器对非球面检测中的球差进行补偿,实现零位检测,其技术和工艺相对比较成熟,目前仍然广泛应用于高精度非球面检验中。这两种方法用于离轴面非球面检测时,离轴非球面一般作为同轴母镜的部分区域被检测,检测光路具有回转对称性,然而,由于离轴非球面的非对称性,检测过程中离轴非球面的位置调整困难^[7],对离轴量偏大的离轴非球面,其母镜的相对口径过大,导致补偿器的设计和加工难度增加,甚至可能无法设计出合格的补偿器^[8]。此外,传统补偿器的检测精度受限于光学设计残差、各个球面加工面形残差和组装误差,另外其复杂的制造过程也存在潜在的制造错误风险,如哈勃望远镜主镜^[9]和欧洲南方天文台新技术望远镜(New Technology Telescope, NTT)主镜^[10]由于检测过程的错误导致了巨大的经济损失,因此需采用其它独立手段对其

进行检测以保证其可靠性^[11]。

衍射式光学补偿法采用衍射光学元件计算全息图(Computer Generated Hologram, CGH)作为补偿器,该方法起源于上世纪 70 年代^[12],但随近年微电子行业的光刻技术飞速发展,CGH 制作精度得到大幅提高后,CGH 光学检测技术才逐渐发展为一种高精度的光学检测技术^[13]。和传统补偿器相比,CGH 检测方法具有设计残差小、结构简单、无组装误差、制作周期短、设计灵活等优点,因此被多家公司和研究机构采纳并成功制造了质量优良的同轴非球面;近年国内也开展了 CGH 光学检测技术方面的研究,在模拟分析和实验中均取得了一定进展^[14-16]。

本文针对离轴非球面的特点,提出将 CGH 应用于离轴非球面检测的方法。将被检面倾斜平移至轴上作为自由曲面进行检测,并采用离轴方向倾斜作为 CGH 载频,从而减小了检测光路的相对孔径,降低了 CGH 的条纹密度,提高了 CGH 的检测精度。开发了用于 CGH 设计计算的软件,用来设计同时具有检测非球面、指导 CGH 与干涉仪对准、为被检面提供横向定位基准等多项功能的 CGH,并形成了“制版-复制”工艺用于制作振幅型 CGH。设计并制作了具有多项功能的高精度 CGH,对某离轴非球面进行了检测实验,并将用该 CGH 检测所得的检测结果与本实验室成熟的折射式补偿方法所得的检测结果进行了比较。

2 CGH 设计

CGH 用于非球面检测时,可以置于干涉仪的干涉臂、参考臂或者检测臂^[17],为了有效并方便地与商用 Fizeau 型干涉仪结合使用,本文采用了将 CGH 置于检测臂的光路结构。在该检测光路中,检测光两次通过 CGH,CGH 通过衍射效应完成波前补偿从而实现零位检测:检测光第一次通过时,CGH 在波前上附加相位函数 $\varphi(x, y)$ 形成 1 级衍射波前,将球面波变换为理想非球面波;第

二次通过时,CGH在波前上附加相位函数 $-\varphi(x,y)$ 形成 -1 级衍射波前,将理想非球面波变换为球面波。

根据离轴非球面的特点,考虑到零位透镜方法检测离轴非球面方法的缺点以及CGH可以补偿任意类型像差的优点,本文摒弃了将离轴非球面作为其同轴母镜的部分区域进行检测的回转对称检测光路方式,平移并倾斜离轴非球面将其几何中心移至于干涉仪轴上,将离轴非球面作为轴上自由曲面进行补偿检测,如图1所示。CGH所补偿的像差不再是具有回转对称性的球差,而是其母镜球差在离轴非球面的有效区域内分解后得到的多种像差的组合,包括三级球差、三级像散,三级彗差和一些高级像差。和离轴非球面作为母镜的部分区域被检测的方法相比,采用本方法减小了检测光路的相对口径,同时也有效地减少了CGH需要补偿的像差,因此减少了该衍射区域的条纹密度,使得CGH制作精度得到提高。

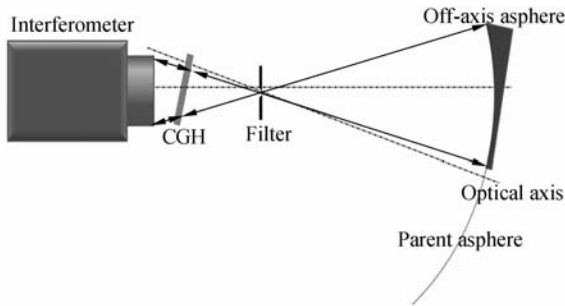


图1 使用CGH检测离轴非球面光路图

Fig. 1 Optical path of testing off-axis aspheric surfaces with CGH

检测光路见图1,CGH被置于干涉仪的焦前,CGH基板引入一定的倾斜以避免基板表面返回鬼像;为了滤掉有效衍射级之外的其它衍射级,选择倾斜作为载频方式^[18],载频方向为离轴方向,并在适当位置使用小孔滤波。检测光第一次通过CGH衍射后,由小孔将 $+1$ 级之外的其它衍射级次滤去;检测光第二次通过CGH被衍射后,形成多个衍射级次进入干涉仪,干涉仪内成像物镜焦点处的针孔将 -1 级之外的其它衍射级次滤去,仅 $(+1,-1)$ 衍射级次与参考光干涉形成条纹。和其它载频方式相比,本方法中采用的载频方式所需要的载频量最小,从而减少了CGH主区域条纹密度,使其制作精度提高。

为了实现光学元件精密调整与定位,在CGH的主区域之外,设计了其它辅助功能区域。完整的CGH包括主区域、对准区域和基准区域。典型的CGH区域分布如图2所示;其中主区域用于非球面面形检测;对准区域用来实现CGH和干涉仪之间相对位置的精确调整;基准区域用来在被检面处投射多个十字线作为被检面的定位基准,如图3所示,该定位基准可用来指导检测过程中被检面位置调整,还可以作为非球面离轴量测量的基准。

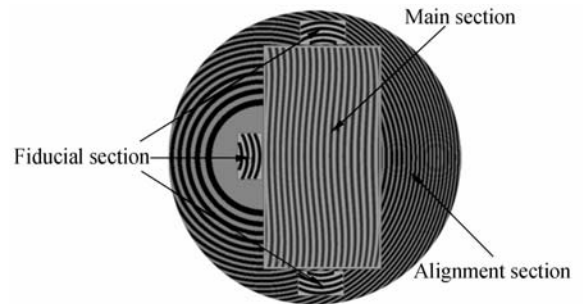


图2 CGH上的衍射区域

Fig. 2 Diffractive sections on CGHs



图3 十字线位置

Fig. 3 Cross-line position

为了完成复杂CGH设计与计算,开发了CGH设计计算软件,在确定光路结构以及各参数后,通过软件优化计算完成CGH设计。CGH补偿器的各衍射区域均由一系列的CGH条纹组成,将CGH补偿器的各衍射区域计算得到的CGH条纹进行离散化并以GDS II文件格式规范对其进行数据编码,得到该CGH的GDS文件。

3 CGH制作

经过大量工艺实践,制定了制作振幅型CGH的工艺规范流程。首先采用激光直写技术制作光

刻掩模板,然后使用 1:1 接触式光刻技术将图案复制到高精度平行玻璃基板上。

位相型 CGH 衍射效率高于振幅型 CGH,但位相型 CGH 需要在振幅型 CGH 的基础上进行深度刻蚀,工艺较为复杂且在深度刻蚀过程中易引入额外的制造误差。振幅型 CGH 可以在透射方向和反射方向使用,CGH 的主区域、对准区域和基准区域可以采用同样工艺进制制作,因而振幅型 CGH 具有制作工艺相对简单,制作精度更高的优点。考虑到本实验室主要致力于 SiC 反射镜制造,使用低温 PVD 工艺改性后的 Si-SiC 材料反射率理论值约为 30.0%,对于振幅型 CGH,使用典型的 Zygo 公司 GPI 系列干涉仪进行检测,检测光与参考光之比为 $10.1\% \times 30.0\% \times 10.1\% : 4\% \approx 1 : 13$,干涉图的条纹可见度理论值为 0.514,满足光学检测需要,因此本文选择使用工艺流程较为简单的振幅型 CGH。

CGH 光刻掩模板的制作依赖于微电子工业的光刻技术,激光直写和电子束直写这两种工艺均可以制作高精度的复杂不规则衍射图案。国内有多家微电子行业的研究和企业单位可以进行光刻掩模板制作,较为先进的光刻技术可以达到优于 100 nm 的位置误差公差。设计生成的 GDS II 格式文件是制版行业的通用格式文件,用来驱动激光直写机器制作光刻掩模板。

常用的光刻掩模板一般不能直接用于光学检测,原因包括两方面:掩模板的两面面形精度一般远低于光学精度,即使将该面形误差测量出来并在光学检测中作为系统误差进行补偿,其补偿精度也难以满足检测要求;掩模板厚度往往只能由微刻机器指定,通常光刻掩模板基板的径厚比超过 20,在其使用过程中易装卡变形从而给光学检测带来额外的误差。为了提高检测精度,本文采用 1:1 接触式光刻技术,将光刻掩模板的图案复制到具有高光学精度的平行玻璃基板上,形成用于光学检测的 CGH。

在实际制作过程中选择了折射率均匀性优异的 BK7 玻璃,采用双面抛光方法制作高光学精度的平行玻璃基板。本实验中的 $\varnothing 80$ mm 厚度 10 mm 的玻璃基板,经精密加工后楔角 $< 3''$,在基板有效口径内,去除倾斜后的两面等厚误差优于 $\lambda/60$ rms。在基板上镀制厚度约为 100 nm 的均匀铬膜后,再覆以均匀的光刻胶,将光刻掩模板放置在基板上,其图案和基板的光刻胶相向,以平行光入射光刻掩模板,使得基板光刻胶层上与掩模板无铬区相对应的区域被曝光,如图 4 左所示。再经历显影、刻蚀和清洗过程后,在高精度平行玻璃基板上可以获得与光刻掩模板一致的图案,形成高精度振幅型 CGH,经过复制工艺所得到的 CGH 实物如图 4 右所示。

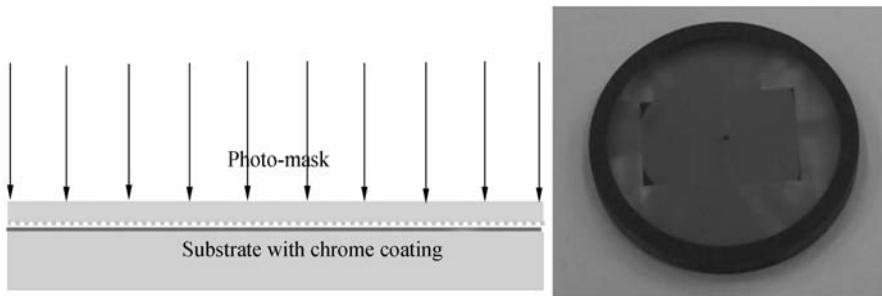


图 4 CGH 复制

Fig. 4 Replication process of CGH

4 CGH 检测实验

为了验证 CGH 设计方法以及制作工艺,本文选择某高次离轴非球面进行了 CGH 光学检测实验,该高次离轴非球面的基本参数见表 1。

表 1 离轴非球面参数

Tab. 1 Parameters of off-axis aspheric surfaces

序号	项目	参数数值
1	顶点曲率半径 R	2 530
2	圆锥系数 K	-2.714 1
3	高次项系数 A_6	$-5.5139 9 \times 10^{-18}$
4	高次项系数 A_8	$6.405 32 \times 10^{-23}$
5	外形尺寸	350 mm \times 210 mm
6	离轴量	154.9 mm

针对该非球面进行 CGH 设计,使用 Zemax 软件模拟得到的设计残差如图 5 所示,残差优于 $1/10\ 000\ \text{rms}$ 。由于设计时被检面移至轴上检测并且使用离轴方向倾斜作为载频,主 CGH 衍射区域内各处条纹密度较低,最大条纹密度约为 $35\ \text{pl/mm}$ 。对该检测方案进行误差分析,得到误差分析结果如表 2 所示。

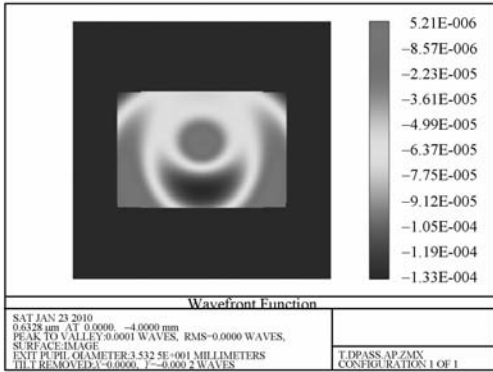


Fig. 5 Design error of CGH

图 5 CGH 设计残差

表 2 CGH 检测精度分析

Tab. 2 Tolerance of CGH testing method

误差来源	检测精度影响 (rms)	备注
设计残差	$0.000\ 0\lambda$	
计算误差	$0.001\ 0\lambda$	刻划精度: 位置误差 $\sigma=100\ \text{nm}$ $1/60\lambda\ \text{rms}$ 等厚误差, $3''$ 以内楔角
制版误差	$0.002\ 9\lambda$	
基板误差	$0.008\ 5\lambda$	
其它误差	$0.001\ 0\lambda$	
误差合成结果 (RSS)	$0.009\ 0\lambda$	

实验光路如图 6(a)所示。其中,CGH 通过可旋转的装卡结构与 Zygo 五维调整架连接,实现 CGH 的 6 自由度精密调整。检测过程中,先以对准 CGH 所产生的干涉条纹为指导完成 CGH 和干涉仪的相对位置调整;直至对准 CGH 区域少于两对干涉条纹,且干涉仪测量的离焦误差 $< 0.5\lambda$ 。CGH 位置调整完毕后,CGH 的基准区域在被检面处投射了 3 个位置准确的十字线,误差分析表明十字线的位置精度优于 $10\ \mu$,由于衍射效应实验中十字线宽度约为 $0.2\sim 0.3\ \text{mm}$,需要使用 CCD 辅助判断并计算其中心才能充分利用其精度,然而对于本实验中离轴量控制,使用



(a) 使用 CGH 检测离轴非球面

(a) Test off-axis aspheric surfaces with CGH



(b) 干涉仪中的条纹

(b) Fringes in interferometer



(c) CGH 所投射的十字线

(c) Cross-line projected by CGH

图 6 CGH 检测实验

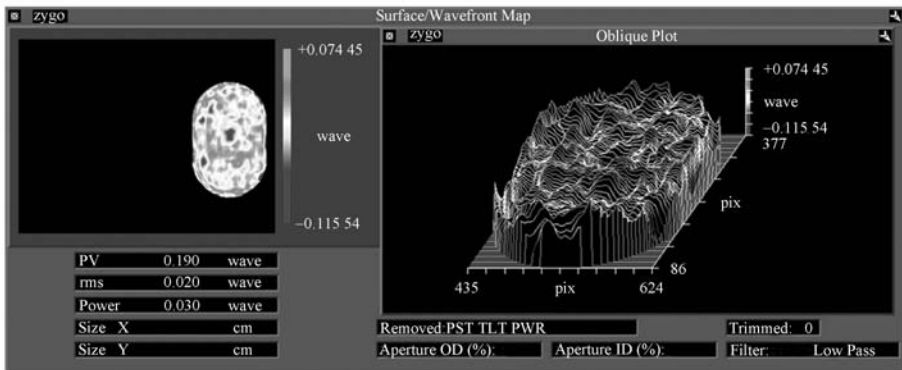
Fig. 6 Test experiments with CGH

目视观察判读的精度足够。以 3 个十字线为指导调整非球面的 x 和 y 平移以及绕光轴的旋转,选择正确的检测光衍射级次与参考光在干涉仪中形成干涉条纹,以干涉条纹为指导微调非球面的倾斜以及 z 方向平移后,便可使用干涉仪对该非球面进行高精度干涉检测。图 6(b)为检测过程中的主区域和对准区域形成的干涉条纹,为了在图上直观显示,对准区域和主区域的条纹均未调整为零条纹状态,实际检测中,这两者均尽可能调整为零条纹以获得尽可能小的检测误差。图 6(c)

为在被检面处投射形成的十字线基准标记,其中由于被检面实际镜胚尺寸比 CGH 设计时所采纳的数据略小,导致上下边缘的十字线与被检面有

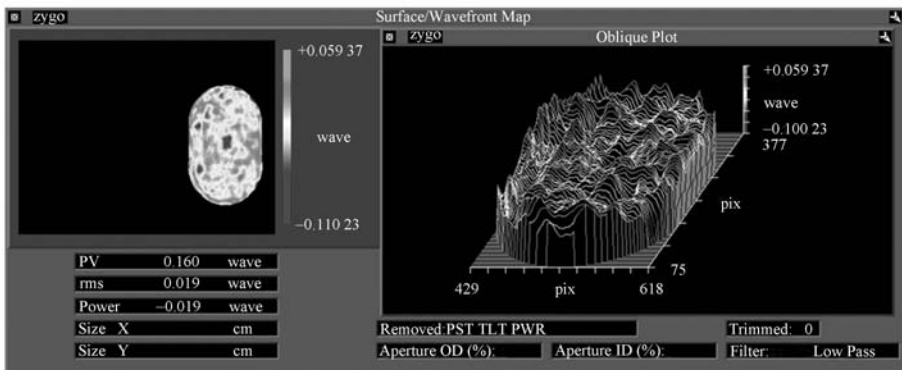
一定间隔。

使用 null-lens 检测方法和使用 CGH 检测方法的检测结果比对如图 7 所示:



(a) 使用零位透镜补偿器检测结果

(a) Test result with null lens



(b) 使用 CGH 检测结果

(b) Test result with CGH

图 7 检测结果比较

Fig. 7 Comparison of test results

为实现两者的精确比较,检测过程中调整检测光路以使两种检测方法被检面在 CCD 上成像区域尺寸一致,然而实验时发现两种检测方法的被检面在 CCD 上成像的畸变存在一定差异,无法通过两者直接相减来计算两检测结果的差值。检测结果中, null lens 检测结果为 0.190λ PV, 0.020λ rms, CGH 检测结果为 0.160λ PV, 0.019λ rms,两者在数值上仅相差 $\lambda/1\ 000$ rms,通过对比两种方法检测结果的局部细节,两种方法检测结果无明显差异,表明所采用的 CGH 设计方法以及制作技术完全可以满足高精度离轴非球面检测要求,可以进行工程应用。

5 结 论

本文针对离轴非球面的特点,提出了一种使用 CGH 技术实现离轴非球面高精度光学检测的方法。将被检非球面倾斜平移后作为轴上的自由曲面进行检测,减小了 CGH 需要补偿的像差;在离轴方向上使用倾斜作为载频,有效地减少了 CGH 的条纹密度。采用自行开发的 CGH 专用设计计算软件,其设计精度可优于 $0.000\ 1 \lambda$ rms,设计完成的 CGH 同时具有非球面检验、检测光路对准、被检非球面面基准定位等多项功能,CGH 的对准功能在检测过程中可快速并精确地实现 CGH 和干涉仪之间的调整;CGH 所投射的

十字线可以作为被检非球面定位基准,在检测过程中可有效地指导被检面的位置精确调整,以十字线为基准可方便准确地测量其离轴量,同步完成离轴非球面高精度定位、光路对准及面形检验,从而解决了零位透镜补偿器中缺少定位基准以及

光路调整的难题。精度分析表明,该方法的检测精度约为 $\lambda/100$ rms,实验中对某面形精度约 $\lambda/50$ rms离轴非球面进行检测,该精度下 CGH 方法检测结果与 null-lens 检测结果一致,可满足高精度非球面检测需求。

参考文献:

- [1] 李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2485-2490.
LI ZH L, XUE D L, ZHANG X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2485-2490. (in Chinese)
- [2] SASIAN J M. New developments in the design of ring-field projection cameras for EUV lithography: passive pupil correction [J]. *SPIE*, 1998, 3482: 658-663.
- [3] DESCOUR M R, WILLER M R, CLARKE D S, *et al.*. Misalignment modes in high-performance optical systems [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7):1737-1747.
- [4] 王孝坤,王丽辉,张学军. 子孔径拼接干涉法检测非球面[J]. 光学精密工程,2007,15(2):192-198.
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 192-198. (in Chinese)
- [5] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. 3rd Ed.. Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [6] Abe Offner. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. *Applied Optics*, 1963,2(2):153-156.
- [7] ZHENG L G, XUE D L, ZHANG X J. Computer aided alignment for off-axis asphere null test [J]. *SPIE*,2005,5638:319-323.
- [8] RUDA M C. *Methods for null testing sections of aspheric surfaces*[D]. Tucson:University of Arizona, 1979.
- [9] ALLEN L J, ANGEL R P, MONGUS J D, *et al.*. The hubble space telescope optical systems failure report. NASA Report, NASA, Washington, D. C., November 1990.
- [10] WILSON R N, FRANZA F, NOETHE L, *et al.*. Active optics IV. set-up and performance of the optics of the ESO new technology telescope (NTT) in the observatory[J]. *Journal of Modern Optics*, 1991,38(2):219-243.
- [11] BURGE J H. *Advanced techniques for measuring primary mirrors for astronomical telescopes* [D]. Tucson:University of Arizona, 1993.
- [12] MACGOVERN A J, WYANT J C.. Computer generated holograms for testing optical elements [J]. *Applied optics*. 1971,10(3),619-624.
- [13] POLESHCHUK A G, KOROLKOV V P, NASYROV R K, *et al.*. Computer generated holograms: fabrication and application for precision optical testing [J]. *SPIE*, 2008,7102:7102061-9.
- [14] 卢振武,刘华,李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. 光学精密工程,2004,12(6):555-559.
WU ZH W, LIU H, LI F Y. Aspheric surface testing with CGH on curved surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6):555-559. (in Chinese)
- [15] 许英朝,周平,张新. 三次位相传播中的波像差及在 CGH 中衍射级次的分离[J]. 光学精密工程,2008,16(11):2104-2109.
XU Y CH, ZHOU P, ZHANG X. Wavefront aberration of cubic phase in propagation and order separation by computer generated hologram [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2104-2109. (in Chinese)
- [16] 胡特,张海涛,寇永杰,等. 计算全息检测非球面的模拟计算研究[J]. 激光杂志,2009,30(1):44-46.
HU T, ZHANG H T, PAN Y J, *et al.*. Simulation of CGH testing aspherical surface [J]. *Laser Journal*, 2009,30(1):44-46. (in Chinese)
- [17] BURGE J H. Applications of computer-generated

holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[J]. *SPIE*, 1995, 2576: 258-269.

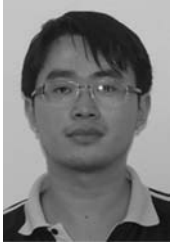
[18] LINDLEIN N. Analysis of the disturbing diffrac-

tion orders of computer-generated holograms used for testing optical aspherics [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(16): 2698-2708.

作者简介:



黎发志(1983—),男,湖南醴陵人,博士研究生,2006年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学检测和光学系统装调等方面的研究。E-mail: wildream.ustc@gmail.com



罗 霄(1982—),男,湖北宜昌人,博士研究生,2006年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学加工和机械设计等方面的研究。E-mail: pb02009065@163.com



赵晶丽(1962—),女,吉林长春人,高级实验师,主要从事衍射光学元件制作等方面的研究。Email: fxg@163.com



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,博士,副研究员,主要从事光学检测和空间光学系统设计等方面的研究。E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn



郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要从事先进光学制造等方面的研究。E-mail: zhenglg@ciomp.ac.cn

导师简介:



张学军(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn